第47卷 第3期
2024年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 3
Mar. 2024

新疆植被总初级生产力对大气水分亏缺的响应

姜 萍[1]， 袁 野[2]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；
2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要：近几十年来新疆气候变化显著，“暖湿化”转型与“湿干转折”先后出现，势必对地区植被生产力、大气干旱状况以及二者间的响应关系产生影响。以植被总初级生产力(GPP)和大气水分亏缺(VPD)作为评价指标，分析了1982—2018年新疆地区植被GPP、VPD的时空分布与演变规律，并揭示了大气水分胁迫对植被GPP的影响。结果表明：(1) 新疆植被GPP整体具有北高南低的分布特征，年均值为256.6 g C·m^{-2}·a^{-1}，呈显著上升趋势。GPP增加趋势占植被总面积的82.00%，其中增加显著区约占42.81%，多分布于南疆绿洲和北疆山前农业区；GPP下降趋势占比较小且分布零散。(2) 新疆地区VPD具有“山区低、平原/盆地高”的鲜明格局，年均值为0.66 kPa，呈不显著波动上升趋势。全疆大部分地区表现出VPD显著性上升，下降趋势零星出现在昆仑山脉高海拔山区。(3) 新疆植被GPP对VPD的响应“正负共存”，并具有明显空间异质性。GPP与VPD的负相关占植被区总面积的54.52%，主要出现在山前草地地带；正相关则主要分布在塔里木盆地边缘和天山北坡及其东段，以栽培作物和灌木类型为主。VPD对GPP的影响在不同植被类型间差异鲜明，而在同一植被类型内正、负响应共存。分析认为，虽然大气水分胁迫尚未成为地区植被生产力变化的主导驱动力，但在新疆干旱化急剧增加背景下，仍需加强对GPP与VPD响应关系的跟踪。

关 键 词：植被总初级生产力(GPP)；大气水分亏缺(VPD)；时空变化；相关分析；新疆

文章编号：1000－6060(2024)03－0403－10(0403～0412)

植被总初级生产力(GPP)是指绿色植物在单位面积、单位时间内通过光合作用所固定的有机物总量[1]，是生态系统生产能力和健康状况的有效表征[2]。研究表明，尽管干旱、半干旱地区植被稀疏，年生产力低下，但其对区域生态系统稳定性[3]乃至全球陆地碳循环的年际至年代际变化均有关键作用[4]。

作为我国典型的干旱、半干旱区，新疆境内植被覆盖度低，多样性贫乏且生产力低下，生态环境极为脆弱，植被对气候变化极为敏感[5]。研究表明，在全球变暖驱动下新疆气候变化显著，早期表现出温度和降水的“突变型”升高[6]、气候由“暖干”向“暖湿化”的转型[7-8]。而进入21世纪以来，新疆逾2/3的地区出现了从“暖湿化”向“暖干化”转折的强烈信号，即发生了“湿干转折”[9]。以快速升温为主的显著气候转型势必会通过加快地区水循环过程、加速高山带冰川积雪融化、改变径流补给形式等，影响植被的生境分布格局及其生产力[10]。基于长时间序列的归一化差值植被指数(NDVI)、净初级生产力(NPP)、叶面积指数(LAI)等多种植被指数，学者已从不同区域尺度对新疆地区植被生长的时空演变格局、自然和人为影响机制以及未来预测等进行了分析[11-15]，研究成果突出。然而，现有研究往往缺乏对新疆地区植被GPP长期时空动态的探讨，难以为揭示地区生态系统碳循环和生态可持续发展提供参考。此外，植被变化归因分析中自然因素的选择通常聚焦于水、热气候因子[11]以及干旱[16]等，尚未关注植被对大气水分胁迫的响应。

最新研究发现，21世纪以来大气水分胁迫对植

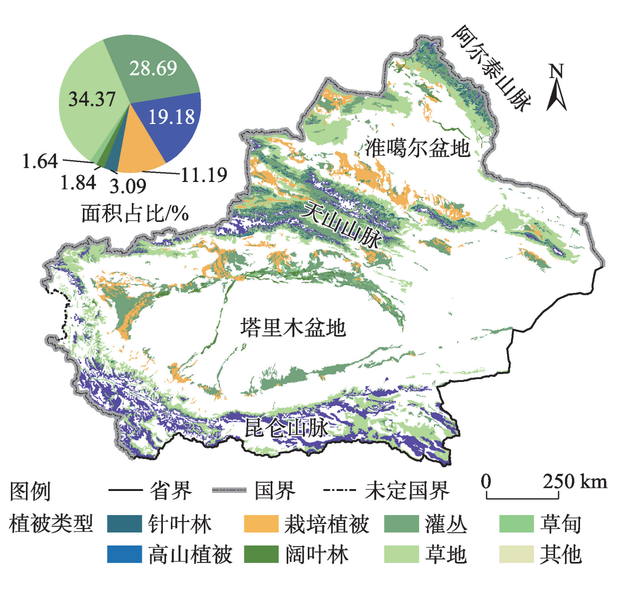
收稿日期：2023-08-08； **修订日期**：2023-09-13
基金项目：新疆维吾尔自治区青年科学基金项目(2022D01B53)资助
作者简介：姜萍(1989-)，女，博士研究生，主要从事生态环境对气候变化的响应研究. E-mail: jp544867803@126.com
通讯作者：袁野(1991-)，男，博士研究生，特别研究助理，主要从事环境遥感方面研究. E-mail: yeyuan.rs@gmail.com

物生理特性和生长状况的影响较之降水和土壤水分可能更高[17],其对植被活动的重要调控作用极有必要得到充分关注[18]。而以大气水分亏缺(VPD)为参量的研究表明,与全球步调一致,新疆地区大气水分胁迫也已出现广泛、急速的增长[19-20]。一般而言,VPD升高会导致植物气孔关闭,降低气孔导度、木质部导水率等抑制光合作用,并通过间接加速土壤水分流失,加剧水分胁迫,最终限制植被生长及其固碳能力,甚至引发植物死亡[20-22]。目前,大气水分胁迫对植被生长及其生产力的显著影响已经得到有力证实[23-24]。鉴于此,本文拟以新疆为研究区,分析1982—2018年新疆植被GPP和VPD的时空变化特征,并探讨植被GPP对VPD的响应,以期为气候转型背景下新疆植被GPP遥感监测、大气"干旱化"评估以及优化生态保护政策提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

新疆(73°40′~96°18′E,34°25′~48°10′N)位于我国西北地区,总面积约为166×10^4 km^2,是中国典型的干旱、半干旱区(图1)。新疆呈"三山夹两盆"的地形分布格局,从北到南依次横亘有阿尔泰山脉、天山山脉和昆仑山脉。三山阻挡大气环流,形成了准噶尔盆地和塔里木盆地,造就了山体、绿洲、盆地交替排布的地理格局。新疆属典型的温带大陆性气候,年均降水量约150 mm,年均气温为9~12 ℃,但天山山脉南部(南疆)、北部(北疆)气候条件迥异,突出表现为南疆气温高于北疆、降水量寡于北疆的特点。受地形、气候的共同影响,新疆地区植被覆盖度低且生境脆弱,极易受到气候变化以及干旱胁迫的影响。



注:该图基于新疆维吾尔自治区自然资源厅标准地图服务网站下载的审图号为新S(2021)023号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1 新疆植被类型空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of vegetation types in Xinjiang

1.2 数据来源与处理

1.2.1 GPP数据 GPP数据采用全球陆地卫星(GLASS)GPP产品,由北京师范大学梁顺林教授团队基于多源遥感数据和地面实测数据自主研发,具有长时间序列、高分辨率、高精度等特征,是研究全球环境变化的可靠依据[25]。GLASS GPP数据空间分辨率0.05°,时间分辨率为8 d,时间跨度为1982—2018年,单位为g C·m^{-2}·d^{-1}。目前,该数据集可由国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn)在线公开获取。研究中采用R编程处理为GPP年值序列,单位g C·m^{-2}·a^{-1}。

1.2.2 气象数据 气象站点观测数据来自新疆维吾尔自治区气象信息中心,涵盖新疆境内105个国家基准气象站基本气象要素月值观测资料,数据经过综合质量控制,满足研究需要。选取各站点1982—2018年气温(TA,℃)、空气相对湿度(RH,%)月值观测序列,采用公式(1)逐站点计算大气水分亏缺(VPD,kPa)参量[24],然后利用专用气候数据空间插值软件ANUSPLIN,以数字高程数据作为协变量,插值得到1 km空间分辨率的月尺度VPD栅格数据。

$$\mathrm{VPD} = 0.611 \times \exp\frac{17.27 \times \mathrm{TA}}{\mathrm{TA} + 237.3} \times \left(1 - \frac{\mathrm{RH}}{100}\right) \tag{1}$$

为验证该VPD栅格数据集的可靠性,本文由哥白尼气候数据中心(https://cds.climate.copernicus.eu/)获取了1982—2018年ERA5再分析资料,选取2 m空气温度(T_a,℃)、2 m露点温度(T_d,℃)月值序列,借鉴文献[21]中方法计算得到VPD(记为VPD_ERA5)用以开展对比检验。ERA5数据是由欧洲中期天气预报中心(ECMWF)建立的一套再分析数据,包含1982—2018年空间分辨率为0.1°的月均数据和日尺度数据,现已在众多领域得到广泛使用。

1.2.3 植被类型数 来自中国科学院资源环境科学数据中心发布的中国1:1000000植被类型数据,根据全国11个植被类型组,将新疆地区植被类型划分为草地、草甸、灌丛、针叶林、阔叶林、高山植被和栽

培植被7类(图1)。研究中采用ArcGIS软件对数据进行投影转换、重采样等处理,使其空间分辨率与GPP、VPD数据相一致。

1.3 研究方法

1.3.1 变化趋势分析 1982—2018年新疆地区年均GPP、VPD的时空变化趋势采用Mann-Kendall(M-K)法完成。M-K趋势分析是一种基于秩的非参数统计方法,其样本无需满足特定的分布,且不受异常值干扰,适用于检测非线性趋势,定量反映变化趋势的显著性[26]。详细算法见参考文献[27]。

1.3.2 Pearson相关系数法 采用Pearson相关系数法对1982—2018年新疆植被覆盖区GPP与VPD之间的相关性及其显著性进行分析,探讨陆地生态系统GPP对大气干旱的响应。

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\bar{X}\right)\left(Y_i-\bar{Y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\bar{X}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i-\bar{Y}\right)^2}} \tag{2}$$

式中:r为Pearson相关系数;n为时间序列长度;X_i、Y_i分别为第i年新疆植被覆盖区GPP、VPD值;$\bar{X}$、$\bar{Y}$分别为对应区域GPP、VPD的多年平均值。

相关系数的显著性采用t检验进行判定,显著性水平α取值为5%。使用R、Python语言程序和ArcGIS 10.2软件进行数据处理和计算。

2 结果与分析

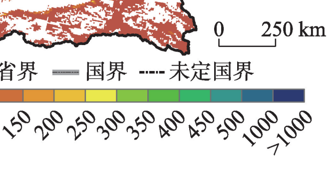
2.1 新疆植被GPP时空变化特征

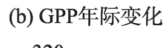
新疆植被GPP区域差异明显,大致呈现北疆高、南疆低的特点(图2a)。整体上,GPP在0~1300 g C·m^{-2}·a^{-1}之间变化。高值区(GPP>500 g C·m^{-2}·a^{-1})主要出现在天山山脉西部的伊犁河谷以及天山北麓、阿尔泰山和准噶尔盆地西北缘山区,其中伊犁河谷局部地区GPP超过1000 g C·m^{-2}·a^{-1}。与北疆不同,南疆多为GPP低值区,尤其是南部昆仑山脉的高寒荒漠植被,GPP普遍低于100 g C·m^{-2}·a^{-1};塔里木盆地边缘同样以GPP低值为主,但盆地边缘绿洲农业区GPP相对较高,年均值在250~500 g C·m^{-2}·a^{-1}之间。新疆植被GPP多年平均值为256.6 g C·m^{-2}·a^{-1},年均值在187.0~309.4 g C·m^{-2}·a^{-1}之间变化,但整体呈显著上升趋势(斜率>0,P<0.01)(图2b),表明期间新疆地区植被状况持续向好。

M-K趋势分析可见(图3),新疆大部分地区植被GPP呈增加趋势,占比达82.00%。其中,GPP增势显著区域占比42.81%,主要分布在天山北麓山前平原、塔里木盆地北缘和西北缘,多为栽培植被和灌木;其次分布于天山山脉、昆仑山脉的局部区域,以高山植被和草地中较为集中;GPP增势不显著区域占比39.19%,较均匀分布于全疆植被区域。在塔里木盆地南缘以及昆仑山脉和天山山脉的零星植被区,GPP表现出下降趋势(不显著下降16.03%,显著下降1.97%)。

2.2 新疆地区VPD时空变化特征

2.2.1 VPD数据一致性检验 因研究区尚不具备VPD实测数据,无法基于测量值验证VPD估算值的准确性,故引入VPD_ERA5作为辅助验证数据,通过其与基于气象站点观测值估算建立的1 km级





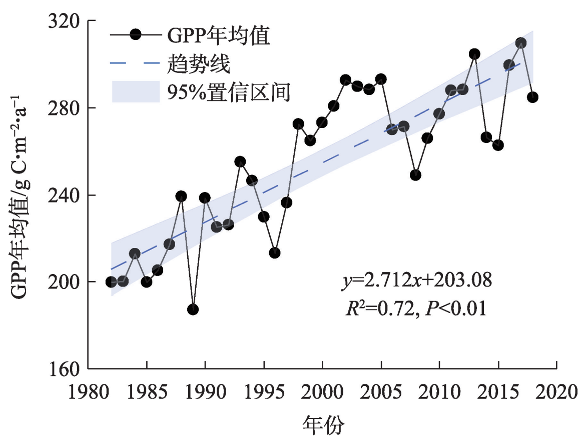


图2　新疆植被总初级生产力(GPP)年均值空间分布及其年际变化

Fig. 2　Spatial distribution and inter-annual variations of annual mean GPP in Xinjiang

图3　新疆植被GPP变化趋势及其显著性检验

Fig. 3　Variation trend and significance test of vegetation GPP in Xinjiang

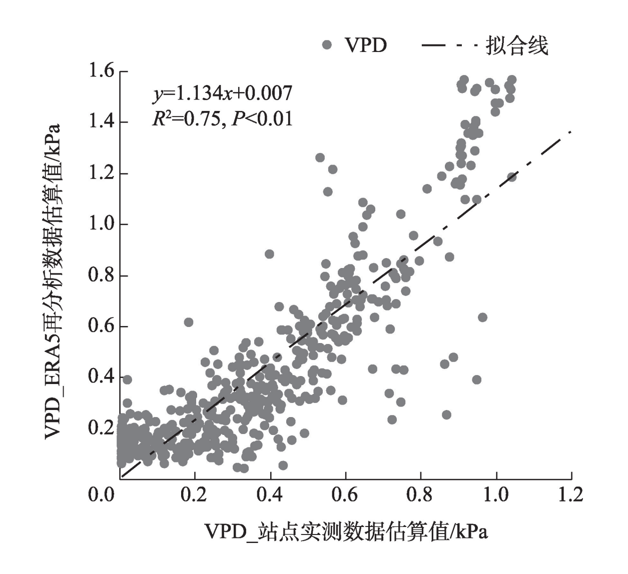


图4　大气水分亏缺(VPD)估算值的一致性分析

Fig. 4　Consistency analysis of VPD estimates

VPD栅格数据的一致性比较,衡量VPD计算和分析结果的准确及可靠性。由图4可见,两套VPD数据之间具有显著的线性关系(P<0.01),R^2达到0.75,表明本文VPD计算序列较为可靠,能够用以评估地区大气“干旱化”的动态并反映其与植被生产力之间的响应关系。

2.2.2　VPD时空变化特征　由VPD年均值空间分布(图5a)可见,大气干旱程度在以湿润、半湿润气候为主的山区普遍较低,VPD基本小于0.4 kPa;平原、盆地等区域大气干旱化严重,VPD长期大于0.7 kPa;上述区域的中间过渡带多为山前平原,VPD处在0.5~0.9 kPa之间。可见,VPD与地形和气候条件之间具有较强的依赖关系。1982—2018年新疆地区VPD多年平均值为0.66 kPa,整体上呈不显著波动上升趋势(P>0.05),但2010年之前年际变化的波动幅度更大(图5b)。VPD在植被覆盖区的多年平均值为0.55 kPa,同样呈不显著上升趋势(图5b)。

1982—2018年新疆地区VPD以上升趋势为主(图6a)。全疆约82.02%的地区VPD上升趋势显著,

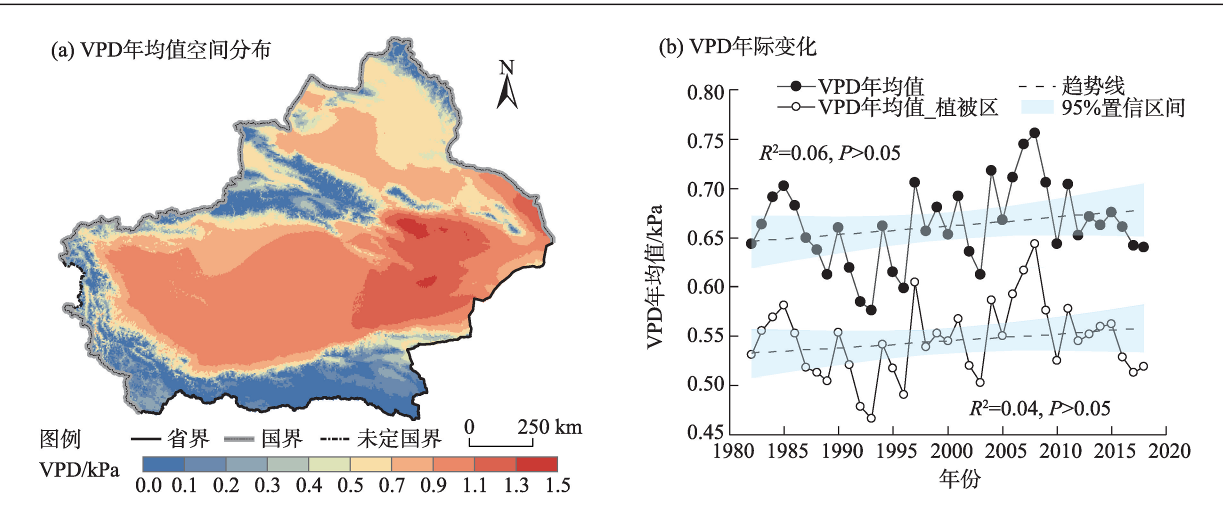


图5　新疆VPD年均值空间分布及其年际变化

Fig. 5　Spatial distribution and inter-annual variations of annual mean VPD and of regional mean VPD in Xinjiang

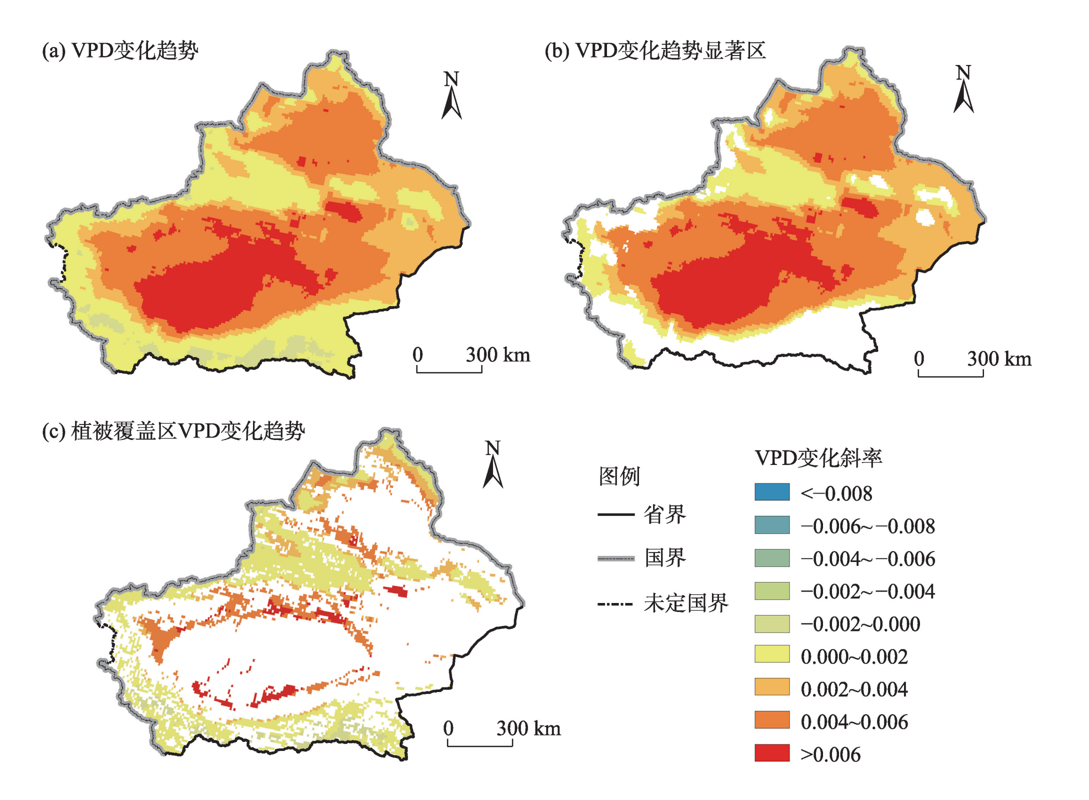


图6　新疆及其植被覆盖区VPD变化趋势

Fig. 6　Variation trends of VPD in Xinjiang and its vegetated areas

又以塔里木盆地和准噶尔盆地增幅最大；仅3.55%的区域VPD为下降趋势，主要出现在昆仑山脉一带(图6b)。新疆植被覆盖区同样面临着VPD普遍增加的趋势(图6c)，可见随着全球变暖趋势的持续与增强，新疆地区已经并可能长期处在的大气"干旱化"逐渐加剧的境况中。

2.3　VPD变化对新疆植被GPP的影响

Pearson相关分析表明，新疆植被GPP对VPD的响应具有显著空间异质性(图7)。二者之间表现出正相关、负相关共存的局面，但负相关性占比更大，为54.52%(其中弱负相关47.27%，显著负相关7.25%)，主要出现在北疆地区，尤其是准噶尔盆地西北部、昆仑山脉南麓一线以及天山山脉北麓的大部区域，相关系数普遍小于-0.4。45.48%的植被区GPP与VPD呈正相关(弱正相关37.08%，显著正相关8.40%)，主要分布在塔里木盆地边缘和天山北坡

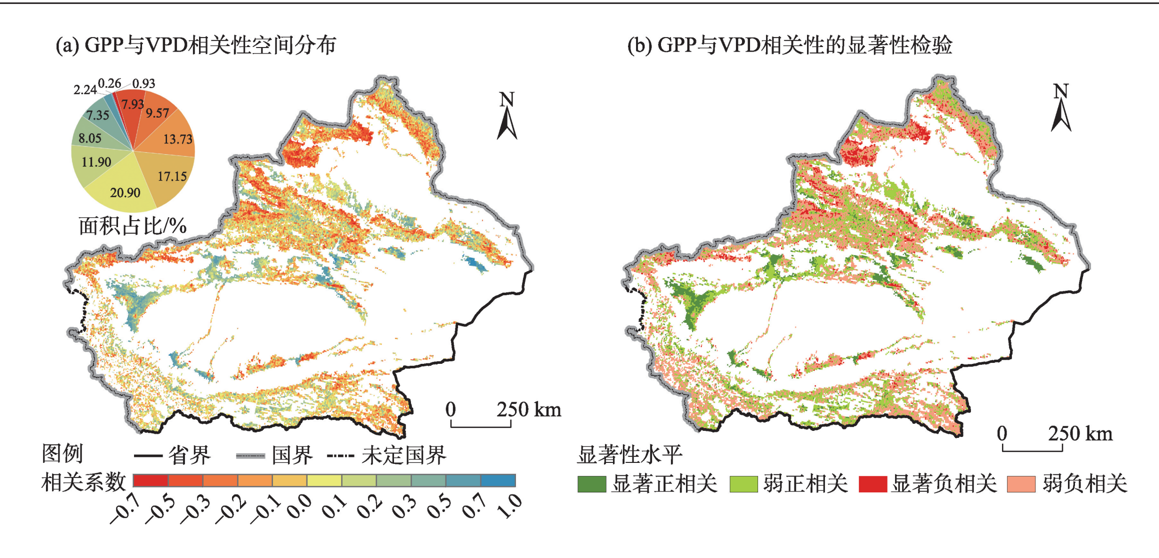


图7 新疆植被覆盖区GPP与VPD的相关性及显著性

Fig. 7 Correlation and significance of GPP and VPD in vegetation cover area of Xinjiang

及其东段,以栽培农业区和灌木为主。

GPP与VPD响应关系在不同植被类型下的统计分析(表1)表明,VPD与GPP的相关性在植被类型之间差异鲜明,但在同一植被类型内"正负"共存。植被GPP对VPD变化的显著正响应主要由灌丛(4.04%)和栽培植被(2.57%)贡献,显著负响应则更多来自于草地(4.61%)。同一植被类型内GPP与VPD相关性的统计分析表明,栽培植被和灌丛的生产力更易受到VPD变化的影响,GPP与VPD显著相关性的类内占比分别为25.42%、19.80%,且均以VPD对GPP的显著促进作用为主;VPD对草地、草甸生产力的影响次之,GPP与VPD显著相关性的类内占比分别为15.97%、15.44%,但草地GPP与VPD主要呈负相关性(显著负相关类内占比13.45%,弱负相关类内占比53.15%),表明VPD增加对草地GPP具有较大的抑制作用;而VPD对草甸GPP的促进(正相关类内占比47.55%)和抑制(负相关类内占比52.45%)作用范围相当;此外,GPP对VPD的负响应在针叶林中同样较为突出,二者的负相关性类内占比达62.54%(弱负相关54.41%、显著负相关8.13%)。

表1 不同植被类型下GPP与VPD相关性的面积占比

Tab. 1 Area proportion of correlation between GPP and VPD under different vegetation types /%

植被类型	占比类别	相关性			
		显著正相关	弱正相关	显著负相关	弱负相关
针叶林	植被区总占比	0.05	1.07	0.24	1.63
	类内占比	-1.65	-35.81	-8.13	-54.41
阔叶林	植被区总占比	0.10	0.78	0.07	0.93
	类内占比	-5.48	-41.45	-3.51	-49.56
草甸	植被区总占比	0.15	0.65	0.11	0.78
	类内占比	-9.07	-38.48	-6.37	-46.08
草地	植被区总占比	0.87	10.59	4.61	18.23
	类内占比	-2.52	-30.88	-13.45	-53.15
灌丛	植被区总占比	4.04	11.35	1.65	11.73
	类内占比	-14.05	-39.44	-5.75	-40.76
高山植被	植被区总占比	0.62	6.94	0.30	11.33
	类内占比	-3.20	-36.19	-1.55	-59.06
栽培植被	植被区总占比	2.57	5.70	0.27	2.64
	类内占比	-22.99	-50.96	-2.43	-23.62
全疆植被覆盖区占比		8.40	37.08	7.25	47.27

综上可见，1982—2018年新疆地区VPD广泛且急剧的增加已经对地区植被GPP的变化产生影响，但二者之间弱相关性（占比为84.35%）出现范围远高于显著相关性（占比为15.65%）。GPP与VPD相关性在不同植被类型之间存在较大差异，且逾15%的栽培植被、灌丛、草地和草甸对VPD的变化已表现出显著响应，这表明VPD对植被生产力的调控可能受到植被类型以及与其相对应的地形、气候条件等外在因素的影响。

3　讨　论

3.1　GPP的空间异质性

受区域水热条件和植被类型的地带性分异规律等综合影响，新疆植被GPP大致表现出"北疆高、南疆低"的空间异质性，这与前人分析结果基本一致[2,28]。研究期间新疆植被GPP普遍呈现增势，表明地区植被生长状况持续向好。气候变化、人类活动以及二者的协同作用是促进新疆大范围地区植被恢复和改善的主要原因[29]。过去几十年间"暖湿化"的气候转型已被证实对新疆植被生产力产生了有利影响，导致植被活动显著增强[29]。如气温持续升高有助于昆仑山脉等高寒荒漠地带的植被得到较好改善；升温能够促进山区冰雪消融，增加地表径流[10]，从而带动盆地边缘灌木植被覆盖度的增加。与此同时，水肥一体化灌溉系统、生态修复工程的相继实施等人为活动也对地区植被的持续改善提供了有力支撑[30]。栽培植被长期受到人为活动最频繁、最直接的干预，因此成为GPP显著增加的主体。近20 a间塔里木河流域生态输水工程的实施[31]，使塔里木盆地北缘流域地带生态环境得到整体改善，植被GPP增势显著。但上述因素也不同程度上导致了地区植被的退化和生产力的降低，如更频繁的干旱和过度放牧等，导致以草地为主的旱区植被的迅速退化[29]。

3.2　VPD的空间异质性

新疆地区VPD表现出"山区低、平原/盆地高、山区增势弱于平原/盆地"的主要特点，认为是由地形、气候和植被类型等多因素的综合影响所致。研究表明，21世纪以来新疆气候已经发生了从"暖湿化"向"暖干化"演变的"湿干转折"[9]，气温的跃变式升高和持续高位波动，辅以降水的弱态减少，无疑会加速大气水分流失，导致新疆大范围地区大气干旱化程度加剧。其中，北疆山区雨水充沛且植被覆盖度高，能长期以直接降水和植被蒸腾作用等形式增补大气湿度[32]，维持VPD低值并减缓其增速；南疆山区常年积雪覆盖、温度较低，以致大气饱和水汽压不高，加之变暖引起的冰雪消融对实际水汽压的持续补充[33]，导致VPD较低且在气候变暖背景下增速缓慢甚至出现下降趋势。与此同时，植被、降水和冰雪消融等对地表径流、土壤湿度、地表蒸散发的调节和调控，也为山区VPD维持低值提供了间接保障[19]。而以塔里木和准噶尔盆地为主的沙漠、荒漠和戈壁地带，长期高温少雨、日照强烈而植被稀疏、地表水源匮乏，以致大气水汽的直接与间接来源相对不足，大气水分亏缺严重且增势显著。

3.3　VPD对GPP的影响

本文分析表明，VPD变化已经对新疆地区植被生产力产生影响，逾1/2的植被区GPP与VPD呈负相关，并大量分布于北疆GPP高值区，这说明增强的大气水分胁迫已经并可能继续对新疆主要植被区，尤其是生态关键区的植被生产力造成威胁。GPP与VPD之间的显著相关性主要出现在栽培作物、灌丛和草地3种植被类型中。有研究证实，随着农业技术的不断发展，干旱区栽培作物受人类活动恢复作用的影响最大[29]，这可能是栽培植被GPP在VPD升高背景下仍然显著增加的主要原因。灌丛GPP与VPD之间14.05%的显著正相关主要发生于塔里木盆地边缘地带，认为是由于VPD持续升高时对应的增暖会导致山区冰雪消融量和径流量增加，内陆湖泊水位显著上升，促进了植被生长[34]。已有研究表明，在土壤亏缺情景下，干旱区草地生态系统的GPP更易受到VPD的负面影响[24]，这与本文中草地最主要受到VPD升高的抑制作用的结论相一致。上述现象进一步证实了孟莹等[24]的观点，即植被生产力对大气干旱的响应在不同生态系统中存在异质性，该异质性有必要在未来大气干旱程度将持续增强的背景下得到重点关注。

本研究表明当前新疆植被GPP对VPD的响应更多处于非显著性区间内，但后续仍应加强对二者响应关系的跟踪，并结合其他自然（如气温、降水、干旱、土壤湿度等）和人为活动等多种因素，开展植被GPP变化驱动力的定量分析，为优化地区生态修复与治理提供科学参考。

4 结论

（1）1982—2018年新疆植被GPP空间分布有明显异质性，大致呈北高南低的分布格局。高值区集中在天山山脉西部的伊犁河谷、天山北麓、阿尔泰山以及准噶尔盆地西北部边缘山区，低值区则分布在南疆大部，尤以昆仑山脉的高寒荒漠植被生产力最弱。GPP年均值为256.6 g C·m^{-2}·a^{-1}，总体呈显著上升趋势。全疆约82.00%的植被区表现出GPP的增加趋势，增势显著区占比42.81%，多分布于盆地边缘绿洲或山前农业区；GPP呈下降趋势的地区约占18.00%，分布较为零散。

（2）新疆地区VPD空间分布表现出"山区低、平原/盆地高"的主要特点。山区VPD基本小于0.4 kPa，沙漠、盆地等区域VPD长期大于0.7 kPa。VPD年均值为0.66 kPa，整体呈不显著波动上升趋势。变化趋势分析表明，全疆82.02%的地区VPD上升趋势显著，又以两大盆地增势最为突出；仅3.55%的区域VPD呈下降趋势，主要出现在昆仑山脉高海拔山区。新疆植被覆盖区同样面临VPD普遍增加的趋势。

（3）Pearson相关分析表明，新疆植被GPP对VPD的响应"正负共存"，且具有明显区域差异。GPP与VPD的负相关性占植被区总面积的54.52%，略大于正相关性占比（45.48%），并主要出现在南、北疆山前缘地区的草地地带；正相关性主要分布在塔里木盆地边缘和天山北坡及其东段，以农业区栽培作物和灌木类型为主。

参考文献（References）

[1] Sun Z Y, Wang X F, Yamamoto H, et al. Spatial pattern of GPP variations in terrestrial ecosystems and its drivers: Climatic factors, CO_2 concentration and land-cover change, 1982—2015[J]. Ecological Informatics, 2018, 46: 156−165.

[2] 高振翔, 叶剑, 丁仁惠, 等. 中国植被总初级生产力对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 394−399. [Gao Zhenxiang, Ye Jian, Ding Renhui, et al. Response of vegetation gross primary productivity to climate change in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 394−399.]

[3] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3127−3136. [Zou Hui, Gao Guangyao, Fu Bojie. The relationship between grassland ecosystem and soil water in arid and semi-arid areas: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3127−3136.]

[4] Ahlström A, Michael R, Guy S, et al. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO_2 sink[J]. Science, 2015, 348: 895−899.

[5] 毕晓丽, 王辉, 葛剑平. 植被归一化指数(NDVI)及气候因子相关起伏型时间序列变化分析[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 284−288. [Bi Xiaoli, Wang Hui, Ge Jianping. Wave-type time series variation of the correlation between NDVI and climatic factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 284−288.]

[6] 陈亚宁, 李玉朋, 李稚, 等. 全球气候变化对干旱区影响分析[J]. 地球科学进展, 2022, 37(2): 111−119. [Chen Yaning, Li Yupeng, Li Zhi, et al. Analysis of the impact of global climate change on dryland areas[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(2): 111−119.]

[7] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152−164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152−164.]

[8] 赵传成, 王雁, 丁永建, 等. 西北地区近50年气温及降水的时空变化[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 385−390. [Zhao Chuancheng, Wang Yan, Ding Yongjian, et al. Spatial temporal variations of temperature and precipitation in northern China in recent 50 years [J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(2): 385−390.]

[9] 姚俊强, 毛炜峄, 陈静, 等. 新疆气候"湿干转折"的信号和影响探讨[J]. 地理学报, 2021, 76(1): 57−72. [Yao Junqiang, Mao Weiyi, Chen Jing, et al. Signal and impact of wet-to-dry shift over Xinjiang, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(1): 57−72.]

[10] 高晓宇, 郝海超, 张雪琪, 等. 中国西北干旱区植被水分利用效率变化对气象要素的响应——以新疆为例[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1111−1120. [Gao Xiaoyu, Hao Haichao, Zhang Xueqi, et al. Variation and driving mechanism of vegetation water use efficiency in arid areas of northwest China: A case of Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1111−1120.]

[11] 张山清, 普宗朝, 伏晓慧, 等. 气候变化对新疆自然植被净第一性生产力的影响[J]. 干旱区研究, 2010, 27(6): 905−914. [Zhang Shanqing, Pu Zongchao, Fu Xiaohui, et al. Effect of climate change on NPP of natural vegetation in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(6): 905−914.]

[12] 丹利, 季劲钧, 马柱国. 新疆植被生产力与叶面积指数的变化及其对气候的响应[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3582−3592. [Dan Li, Ji Jinjun, Ma Zhuguo. The variation of net primary production and leaf area index over Xinjiang Autonomous Region and its response to climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3582−3592.]

[13] 慈晖, 张强. 新疆NDVI时空特征及气候变化影响研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(5): 662−671. [Ci Hui, Zhang Qiang. Spatio-temporal patterns of NDVI variations and possible relations with climate changes in Xinjiang Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(5): 662−671.]

[14] 杜加强, 赵晨曦, 房世峰, 等. 近30 a新疆月NDVI动态变化及

其驱动因子分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 172-180. [Du Jiaqiang, Zhao Chenxi, Fang Shifeng, et al. Analysis on spatio-temporal trends and drivers in monthly NDVI during recent decades in Xinjiang, China based two datasets[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(5): 172-180.]

[15] 何宝忠, 丁建丽, 张喆, 等. 新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1948-1966. [He Baozhong, Ding Jianli, Zhang Zhe, et al. Experimental analysis of spatial and temporal dynamics of fractional vegetation cover in Xinjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(11): 1948-1966.]

[16] 袁先雷, 彭志潮, 刘雪宁. 新疆地区植被对多时间尺度干旱的响应研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(3): 129-136. [Yuan Xianlei, Peng Zhichao, Liu Xuening. Different time-scale responses of vegetation to the SPEI drought index in Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2021, 15(3): 129-136.]

[17] Sulman B N, Roman D T, Yi K, et al. High atmospheric demand for water can limit forest carbon uptake and transpiration as severely as dry soil[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(18): 9686-9695.

[18] He B, Chen C, Lin S R, et al. Worldwide impacts of atmospheric vapor pressure deficit on the interannual variability of terrestrial carbon sinks[J]. National Science Review, 2022, 9(4): nwab150, doi: 10.1093/nsr/nwab150.

[19] 姜萍, 胡列群, 许婷婷. 近60 a新疆大气水分亏缺的时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2023, 46(1): 1-10. [Jiang Ping, Hu Liequn, Xu Tingting. Spatiotemporal variations of vapor pressure deficit in Xinjiang in recent 60 years[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(1): 1-10.]

[20] Yuan W P, Zheng Y, Piao S L, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth[J]. Science Advances, 2019, 5: eaax1396, doi: 10.1126/sciadv.aax1396.

[21] 张继平, 刘春兰, 郝海广, 等. 基于MODIS GPP/NPP数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 8-13. [Zhang Jiping, Liu Chunlan, Hao Haiguang, et al. Spatial-temporal change of carbon storage and carbon sink of grassland ecosystem in the Three-River headwaters region based on MODIS GPP/NPP data[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(1): 8-13.]

[22] He P X, Han Z M, He M Z, et al. Atmospheric dryness thresholds of grassland productivity decline in China[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 338: 117780, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117780.

[23] Christina M, Restaino D L, et al. Increased water deficit decreases Douglas fir growth throughout western US forests[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(34): 9557-9562.

[24] 孟莹, 姜鹏, 方缘. 大气水分亏缺对中国两种典型草地生态系统总初级生产力的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3633-3642. [Meng Ying, Jiang Peng, Fang Yuan. Contrasting impacts of vapor pressure deficit on gross primary productivity in two typical grassland ecosystems in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3633-3642.]

[25] Wang S H, Zhang Y G, Ju W M, et al. Tracking the seasonal and inter-annual variations of global gross primary production during last four decades using satellite near-infrared reflectance data[J]. Science of the Total Environment, 2020, 755: 142569, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142569.

[26] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3-4): 350-363.

[27] 崔亚婷, 李嬛, 郑龙啸, 等. 基于RSEI的黄河上游流域生态环境质量变化分析[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 107-118. [Cui Yating, Li Huan, Zheng Longxiao, et al. Study of ecological environmental quality changes in the upper Yellow River Basin based on remote sensing ecological index[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(3): 107-118.]

[28] 王鹤松, 贾根锁, 冯锦明, 等. 我国北方地区植被总初级生产力的空间分布与季节变化[J]. 大气科学, 2010, 34(5): 882-890. [Wang Hesong, Jia Gensuo, Feng Jinming, et al. Spatial distribution and seasonality of gross primary production in northern China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(5): 882-890.]

[29] 秦景秀, 郝兴明, 张颖, 等. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 117-125. [Qin Jingxiu, Hao Xingming, Zhang Ying, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation productivity in arid areas[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 117-125.]

[30] 苏冰倩, 王茵茵, 上官周平. 西北地区新一轮退耕还林还草规模分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 59-65. [Su Bingqian, Wang Yinyin, Shangguan Zhouping. Analysis on the scale of a new period of returning farmland to forestland and grassland in northwest China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(4): 59-65.]

[31] 张雪琪, 夏倩倩, 陈亚宁, 等. 近20a塔里木河生态输水对植被总初级生产力变化的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 718-728. [Zhang Xueqi, Xia Qianqian, Chen Yaning, et al. Effects of ecological water conveyance on gross primary productivity of vegetation in Tarim River in recent 20 years[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 718-728.]

[32] 程丹妮, 王颖琪, 程勇翔, 等. 新疆典型沙漠和绿洲植被-水汽-地表温度相关性分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 456-466. [Cheng Danni, Wang Yingqi, Cheng Yongxiang, et al. Vegetation-water vapor-land surface temperature correlation analysis of typical deserts and oases in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(2): 456-466.]

[33] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川, 积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 513-527. [Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): Hydrological effect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 513-527.]

[34] 王伟, 阿里木·赛买提, 马龙, 等. 1986—2019年新疆湖泊变化

时空特征及趋势分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1300−1314. [Wang Wei, Samat Alim, Ma Long, et al. Spatio-temporal variations and trend analysis of lake area in Xinjiang in 1986—2019 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1300−1314.]

Responses of vegetation gross primary production to vapor pressure deficit in Xinjiang

JIANG Ping[1], YUAN Ye[2]

(1. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China;

2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Climate change in Xinjiang, China, has been remarkable in recent decades. With a significant shift from warm-wet to warm-dry, regional vegetation productivity, atmospheric drought conditions, and the response relationship between them will inevitably be affected. Based on multisource data such as ground meteorological observations and reanalysis data, considering remote sensing products, vegetation gross primary productivity (GPP), and vapor pressure deficit (VPD) as indicators, this study analyzed the spatial-temporal distribution and evolution patterns of vegetation GPP and VPD in Xinjiang from 1982 to 2018, as well as the influence of VPD changes on GPP. The results are as follows: (1) The annual mean GPP in Xinjiang was higher in the northern region, especially the mountains, than in the southern region. The annual mean GPP in Xinjiang was 256.6 g $C\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$ with a significant upward trend in interannual variability (R^2=0.72, P<0.01). Approximately 82.00% of the total vegetation area showed an increasing trend, of which the area with significant increase accounted for 42.81%, mostly distributed in the oasis at the edge of the Tarim Basin in southern Xinjiang and agricultural areas on the north slope of Tianshan Mountains. The area with a decreasing GPP trend accounted for a small percentage, and its distribution was scattered. (2) VPD showed a distinct difference of “low in the mountains and high in the basins”. A nonsignificant fluctuating upward trend was observed in the VPD, with an annual mean value of 0.66 kPa. Significant increases in VPD occurred in approximately 82.02% of the whole territory, predominantly in the Tarim and Junggar Basins. In contrast, decreasing trends occurred sporadically in the high-altitude mountainous areas of the Kunlun Mountains. (3) Overall, the response of GPP to VPD was characterized by a distinct spatial heterogeneity with positive and negative correlations. The negative correlation between GPP and VPD accounted for 54.52% of the total vegetation area, mainly in the grassland at the front edge of the mountain. While the positive correlation was mainly distributed at the edge of the Tarim Basin, the northern slope of the Tianshan Mountains and its eastern section were dominated by cultivated crops and shrubs. Comparative analyses showed that GPP-VPD correlations differed significantly across vegetation types. The study proved that the change in VPD has already affected the vegetation productivity in Xinjiang. Although it has not yet become a major limiting factor, there is still a need to strengthen the tracking of the GPP and VPD response relationship to provide a scientific reference for optimizing ecological restoration and governance.

Key words: gross primary production (GPP); vapor pressure deficit (VPD); spatial-temporal change; correlation analysis; Xinjiang